

1

Introdução

Nestes últimos anos tem-se observado um crescimento acelerado de usuários nas redes de telecomunicações e particularmente nas comunicações de redes sem fio quanto aos serviços associados ao acesso em banda larga (fixo e móvel para acesso a dados em alta velocidade). Por outro lado, no que diz respeito a redes sem fio, o espectro radioelétrico utilizado pelos serviços de telecomunicações é um recurso natural limitado que, nos dias atuais, está saturado devido, em parte, a seu uso ineficiente. Dentre as alternativas existentes para um uso mais eficiente do espectro radioelétrico podemos citar o desenvolvimento das seguintes técnicas:

- Sistemas de Comunicações com alta eficiência espectral.
- Técnica Beamforming.
- Antenas Inteligentes.
- Sistemas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).
- *Fractional Frequency Reuse* (FFR).
- Algoritmos de gestão de recursos de rádio.
- Algoritmos de Mitigação de interferência e controle de potência.
- *Small Cells* (Femtocélulas).
- Redes de Rádio Cognitivo.

Neste trabalho o uso de rádio cognitivo será investigado através de simulações computacionais, considerando a aplicação em *Small Cells* ou femtocélulas em sistemas celulares de quarta geração (4G). Além disto, neste trabalho foi considerada a avaliação do cenário de convivência entre sistemas celulares e sistemas de radiodifusão digital em faixas de frequência próximas.

1.1. Redes de Rádio Cognitivo

Rádio Cognitivo é uma tecnologia que utiliza rádios inteligentes que tem a habilidade de sensoriamento de espectro e a capacidade de tomar decisões para ajustar os seus parâmetros de transmissão (potência, modulação, taxa de correção de erros, etc.) dependendo das características do ambiente de propagação, ao mesmo tempo em que compartilham o espectro radioelétrico com outros sistemas e incrementando, portanto, a utilização de uma determinada faixa de frequências tornando seu uso mais eficiente. Esta nova tecnologia tem atraído muita atenção devido à possibilidade de ser utilizada como uma forma de resolver os problemas de escassez de espectro, oferecendo ainda maiores taxas de transmissão aos serviços de comunicação de dados sem produzir interferência nos sistemas que estejam utilizando canais adjacentes ou mesmo co-canais na mesma banda de frequência.

O conceito de Rádio Cognitivo foi por primeira vez proposto na literatura por Joseph Mitola III em 1999, na conferência *Kungliga Tekniska Högskolan (the Royal Institute of Technology in Stockholm, Suécia)* [1]. Basicamente, Mitola define Rádio Cognitivo como um rádio que utiliza um modelo baseado em um raciocínio para atingir um nível específico de competência em relação ao uso dos recursos de rádio [1].

O Ciclo de Cognição [1] [2] mostrado na Figura 1, - descreve o procedimento da aplicação do Rádio Cognitivo. Este ciclo se inicia no momento em que o Rádio Cognitivo analisa o comportamento do seu entorno e reconhece, segundo o contexto, quais são as tarefas de comunicação a realizar segundo a informação disponível.

O conteúdo dos dados são analisados pelo equipamento de rádio cognitivo com o propósito de diminuir a interferência no seu entorno de propagação. Estes geram indicações do comportamento do ambiente de propagação tornando o rádio cognitivo capaz de tomar uma decisão para reduzir a interferência entre os sistemas de comunicação que compartilham a banda de frequência.

A estratégia essencial do Rádio Cognitivo consiste em avaliar e gerar alternativas, compartilhando a informação com os demais dispositivos da rede a fim de obter informação de cada um deles e tomar uma decisão segundo o ambiente e condições de propagação [1]. O Rádio Cognitivo é uma tecnologia cujo objetivo está baseado em observar de forma autônoma o ambiente rádio, para logo deduzir o contexto e avaliar as alternativas para realizar um uso eficiente do espectro radioelétrico. O equipamento de Rádio Cognitivo deve ser capaz de gerar planos, supervisionar os serviços multimídia e aprender das leituras dos seus parâmetros e a informação compartilhada entre os equipamentos que estejam operando no mesmo ambiente de propagação a fim de tomar decisões que melhorem o desempenho da comunicação. [1].

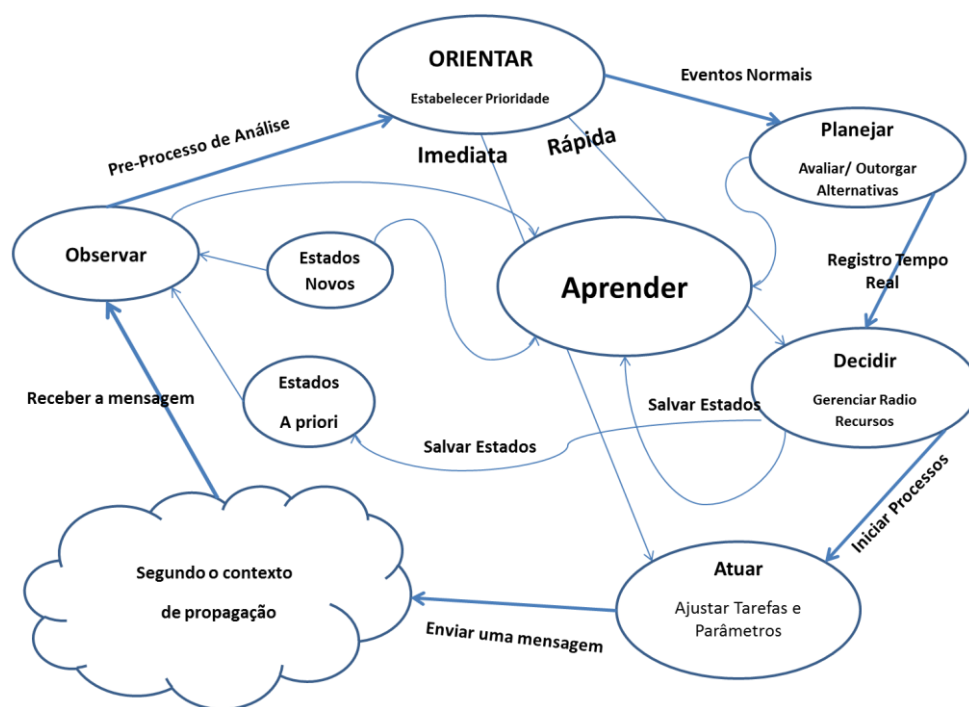


Fig. 1 O Ciclo de Cognição

Na atualidade existem grupos de pesquisa desenvolvendo padrões e testes baseados no conceito do rádio cognitivo. Por exemplo, o padrão IEEE 802.22 WRAN (*Wireless Radio Access Network*) aborda o conceito de rádio cognitivo para a utilização dos espaços livres do espectro de televisão digital, e o grupo Cognea (*Cognitive Networking Alliance*) que propôs o padrão ECMA-392, sendo

este o primeiro orientado para dispositivos portáteis e pessoais em aplicar estes conceitos. Da mesma forma, o grupo de trabalho da IEEE 802.19 designou um grupo de pesquisa conhecido como o 802.19 TG1 formado em 2010 cujo objetivo principal é desenvolver um padrão capaz de otimizar a coexistência entre os dispositivos TVWS (*TV white spaces*).

1.2.

Small Cells (Femtocélulas)

O rápido desenvolvimento dos *smart phones* e *tablets* provocou a mudança da rede móvel de uma rede essencialmente de voz para uma rede móvel de dados provocando um crescimento explosivo da quantidade de tráfego na rede. Dentre as redes sem fio que atualmente fornecem de capacidades de acesso a dados a alta velocidade podemos mencionar as redes WMAN (*Wireless Metropolitan Area Networks*) com tecnologias GPRS, EDGE, HSPA, HSDPA, HSUPA, UMTS, LTE, Wimax, redes de dados WLAN (*Wireless Local Area Networks*, como a rede sem fio Wifi) além das redes WPAN como Bluetooth, ZigBee e NFC (*Near Field Communications*).

Em uma rede com assinantes móveis se faz necessária a continuidade de serviço em diferentes áreas geográficas o que eventualmente é difícil de conseguir em ambientes fechados. Desta maneira, o atendimento ao aumento do tráfego e superação dos problemas de cobertura *indoor* são realizados por meio de implementações de células pequenas, conhecidas como femtocélulas.

As femtocélulas são conhecidas no padrão de sistema móvel LTE Release 10 como Home Enhanced Node B (HeNB) [3]. Uma vez instaladas oferecem melhora de cobertura para os usuários localizados dentro de ambientes fechados, além de contribuir para diminuir o tráfego de dados da macrocélula.

Atualmente, um dos problemas principais na implementação das redes móveis se dá no cenário de coexistência entre as femtocélulas e as macrocélulas (redes heterogêneas) do sistema LTE Release 10. As femtocélulas podem compartilhar a mesma banda de frequência com as macrocélulas, mas, quando os assinantes da macrocélula estão perto das estações base das femtocélulas ou

dentro da sua área de cobertura, experimentam altos níveis de interferência denominada interferência *cross-tier* ou *cross-layer* [11][12].

Entre as técnicas existentes para reduzir a interferência *cross-tier* no cenário das redes heterogêneas, algumas pesquisas apresentam diferentes métodos de solução como, por exemplo, o reuso fracionário de frequências (“*Fractional Frequency Reuses and Resource Partition*”), cuja proposta é gerenciar a interferência nas femtocélulas LTE dividindo o espectro de frequência em várias sub-faixas e cada uma delas designada de forma diferente para as redes da macrocélulas e femtocélulas [4].

Outra opção interessante para minimizar o problema de interferência *cross-tier* é a aplicação da tecnologia de Rádio Cognitivo. A interferência entre femtocélulas e macrocélulas em redes heterogêneas é um dos maiores desafios nos sistemas celulares 4G, deste modo, a utilização da tecnologia de Rádio Cognitivo tem sido proposta como a técnica mais eficiente para redução deste tipo de interferência e que será analisada neste trabalho através de simulações computacionais.

1.3. TV White Spaces (IEEE 802.22)

Uma alternativa para o uso mais eficiente do espectro nas faixas de frequência reservadas para a radiodifusão é a tecnologia denominada *TV White Spaces* (TVWS) que permite a utilização dos canais de televisão na faixa de UHF em áreas geográficas onde não há serviços de transmissão de TV licenciados. Esta tecnologia apareceu como resultado da substituição da televisão analógica pela televisão digital, deixando assim canais analógicos livres para uso de outros sistemas de comunicação, ou mesmo canais licenciados com sombras de cobertura. O termo *White*, no sentido de ter as faixas completamente limpas é uma aproximação devido às baixas potências dos sinais provenientes dos canais adjacentes da televisão digital.

Graças às boas características de propagação nas faixas da televisão (470 a 698 MHz nos Estados Unidos e 470 a 790 MHz na Europa) para comunicações

móveis comparativamente às faixas atualmente utilizadas acima de 1800 MHz, estas faixas oferecem ao mesmo tempo maior área de cobertura e melhores níveis de sinal, permitindo uma redução significativa do número de estações rádio base requerida e portanto do seu custo de operação.

Atualmente, várias entidades de padronização e normalização do mundo como a ITU (*International Telecommunications Union*) e o IEEE (*International Electronic and Electrical Engineering*) estão trabalhando no desenvolvimento de normas e padrões que permitirão a utilização do TVWS sem interferir com os serviços atualmente licenciados. Agências reguladoras importantes a nível mundial, como por exemplo, o OFCOM (*Office of Communications*) da Inglaterra e o FCC (*Federal Communications Commission*) dos Estados Unidos, estão começando a disponibilizar novo espectro para outros serviços nestas faixas de frequência como serviços secundários, ou seja, que eventualmente podem ser afetados por interferência de usuários primários, mas que não poderão causar interferência nos usuários primários.

A nomenclatura utilizada para os componentes de sistemas TVWS é:

- *TV White Spaces*: Segmentos não utilizados do espectro de TV.
- *White Space Devices* (WSD): dispositivos sem fio que funcionam no contexto do TVWS em caráter secundário.

Uma das alternativas para a implementação desta tecnologia é o desenvolvimento de bancos de dados com informações georreferenciadas dos locais onde poderão ser utilizados os WSD, alternativa que não contempla uma inteligência do dispositivo capaz de detectar e decidir por si só o canal a utilizar.

Existem diferentes propostas referentes ao tipo de arquiteturas dos bancos de dados que foram desenvolvidas por várias empresas, como por exemplo, as propostas apresentadas pela Spectrum Bridge detalhada em [5], da Microsoft [6], e da Google Inc. descrito em [7]. A base de dados é utilizada principalmente para registrar as locações protegidas e disponíveis da banda de televisão em uma região específica com o propósito de evitar interferências com os canais de serviços existentes. Quando o TVWS está procurando canais disponíveis, este dispositivo

envia sua localização e requisitos à base de dados que analisa a sua localização e determinara os canais disponíveis que serão enviados ao WSD para que este os utilize.

Além da utilização de banco de dados para determinar os canais disponíveis é possível utilizar técnicas de sensoriamento espectral baseadas na utilização de diferentes tipos de detectores ou algoritmos de detecção. Entre os principais estão o Detector de Energia [8] [9], o Detector Cicloestacionário [10] e o Detector de Colaboração [8] [10]. Todas estas técnicas são responsáveis pela procura dos espaços livres ou TVWS disponíveis no ambiente de propagação, podendo ser implementadas para aplicação prática na banda UHF da TV digital.

Algumas outras vertentes propõem o uso da tecnologia de Rádio Cognitivo e TV White Spaces como uma técnica de rádio que permita diminuir a interferência nas redes heterogêneas. Tais pesquisas são apresentadas em [11] [12] [13].

1.4. Motivação

As aplicações mais relevantes nas quais pode ser aplicado o Rádio Cognitivo sendo uma das áreas mais promissoras para a sua implementação, é em femtocélulas (HeNB) do sistema móvel LTE. O principal problema nas redes heterogêneas é a existência de interferência devido a que ambas células (macrocélulas e femtocélulas) compartilham as mesmas faixas de frequência. Casos de interferência podem acontecer quando os usuários das macrocélulas se encontrem localizados próximos das femtocélulas, provocando quedas e interrupções do sinal recebidas pelo usuário da macrocélula.

Outra aplicação de rádio cognitivo para sistemas móveis celulares é na faixa de UHF devido à combinação da cobertura e a largura de faixa. Nesta faixa os sinais conseguem maiores alcances que os sinais de WiFi e 3G estabelecidos na banda de frequência de 2.4 GHz, e além disto, podem penetrar nos prédios com maior facilidade, apresentando portanto menores atenuações [14].

Desta forma, uma das áreas mais atraentes que Rádio Cognitivo pode ser utilizado considera a sua aplicação nas *Small Cells* ou Femtocélulas (HeNB) do sistema móvel LTE Release 10. O principal problema nestas redes é a existência de interferência devido a que ambas compartilham as mesmas bandas de frequências.

O trabalho de dissertação proposto busca avaliar a implementação de Femtocélulas Cognitivas nas redes heterogêneas e a exploração de TVWS na faixa de UHF.

Ferramentas de simulação permitem avaliar vários cenários de interferência provocados pela coexistência entre a rede da macrocélula (eNodeB) e femtocélula (HeNB) do sistema móvel LTE Release 10 aplicando a tecnologia de rádio cognitivo, com o propósito de diminuir a interferência produzida pelas femtocélulas ou HeNB nos assinantes da macrocélula LTE.

Para avaliação na faixa de UHF são usadas tanto a simulação computacional como a realização de experimental em campo, sem considerar a implementação da tecnologia de rádio cognitivo avaliando apenas a interferência de canal adjacente devido ao cenário de convivência entre o Sistema LTE Release 10 Femtocélula e o Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD) na banda de frequência de 700 MHz.

1.5. Visão Geral da Dissertação

1.5.1. Objetivo da Dissertação

Um dos objetivos desta dissertação é investigar, por meio da utilização do simulador SEAMCAT (*Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool*), a utilização do rádio cognitivo considerando a técnica de sensoriamento espectral aplicada às femtocélulas do sistema móvel LTE Release 10 para reduzir os problemas de interferência *cross-tier* existentes em um cenário de coexistência das redes heterogêneas (femtocélula e macrocélula).

Outro objetivo foi a avaliação da interferência gerada por parte das Femtocélulas LTE Release 10 em receptores de TV digital operando em bandas de frequência adjacentes.

Neste caso, além da simulação computacional considerou-se um *setup* de medição baseado no cenário de coexistência da femtocélula LTE e do Sistema Brasileiro de TV Digital na banda de frequência de 700 MHz.

A implementação experimental considerou um ambiente controlado *indoor* com o objetivo de avaliar a interferência de canal adjacente gerada no Sistema Brasileiro de Televisão Digital produzida pela femtocélula, implementada por meio da plataforma USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) na faixa de 700 MHz sem considerar a aplicação da tecnologia do Rádio Cognitivo.

O cenário de medição foi construído pela configuração e utilização do equipamento de rádio USRP usado como femtocélula. Nas medições com o *setup* se obtiveram resultados de avaliação da interferência de canal adjacente utilizando as métricas BER e MER, para posteriormente compará-las com os resultados obtidos nas simulações realizadas com o simulador SEAMCAT (*Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool*).

1.6. Publicações

Durante a elaboração desta dissertação foram publicados em conferências internacionais os resultados obtidos nas simulações desenvolvidas no programa SEAMCAT versão 4.0.1 e nas medições em campo, considerando diferentes cenários de interferências *indoor*, segundo os parâmetros estabelecidos no padrão 10 do Sistema Móvel LTE e do Sistema Brasileiro de Televisão Digital na faixa de 700 MHz.

- Jussif Abularach A., Luiz da Silva Mello, Carlos Rodriguez R.. **“Simulation of LTE Femtocell Interference Scenarios for Cognitive Radio Implementations”**, *International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), oral presentation – Cognitive Radio Section*, 4 – 7 August 2013, SBMO/IEEE MTT-S 2013, Rio de Janeiro, Brazil.

- Jussif Abularach A., Luiz da Silva Mello, Carlos Rodriguez R., Pedro Gonzalez Castellanos. *“LTE Femtocells Interference Scenario and Coexistence with the Brazilian Digital Broadcast System”*, Wireless Days, Student Award, poster presentation, 13 – 15 November 2013, IFIP/TC6/IEEE, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain.

1.7. Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em oito capítulos. O Capítulo 2 apresenta de forma detalhado a descrição dos diferentes sistemas a serem avaliados, os aspectos e requisitos técnicos do sistema móvel LTE Release 10 e as femtocélulas. A seguir é descrita a situação atual da televisão digital no Brasil e os requisitos técnicos do Sistema Brasileiro de Televisão Digital. Posteriormente, descreve-se o funcionamento e as características do simulador utilizado, o SEAMCAT versão 4.0.1 e do algoritmo de rádio cognitivo implementado no simulador apresentando cada uma de suas funções. Finalmente, são apresentados os modelos de propagação utilizados na configuração de cada cenário de simulação.

O Capítulo 3 apresenta os cenários de interferência e de rádio cognitivo configurados nas simulações desenvolvidas no programa SEAMCAT versão 4.0.1. Posteriormente se apresenta uma análise de cada um dos cenários levados em conta e dos resultados obtidos considerando as vantagens na utilização do rádio cognitivo nas redes heterogêneas.

O Capítulo 4 apresenta os cenários de simulação considerando a avaliação de convivência entre o Sistema Brasileiro de Televisão Digital e o sistema móvel LTE femtocélula na faixa de 700 MHz desenvolvidos no programa SEAMCAT. Este cenário tem o propósito de avaliar a interferência de canal adjacente produzida pela presença da femtocélula LTE interferente, operando próxima do canal de TV digital 51 (695 MHz). Posteriormente, é apresentada uma análise dos cenários e dos resultados obtidos que serão complementados pelos resultados obtidos no Capítulo 6.

O Capítulo 5 está baseado nas medições em campo considerando um ambiente controlado fechado (*indoor*) cujo *setup* leva em conta as características e parâmetros do Sistema Brasileiro de Televisão Digital segundo os requisitos estabelecidos pela ABNT. Neste capítulo descreve-se também o equipamento de rádio USRP configurado como femtocélula segundo os requisitos do sistema móvel LTE Release 10 e das funcionalidades do programa GNU Radio - GNU Radio Companion (GRC).

O Capítulo 6 está baseado na análise e interpretação dos resultados obtidos no cenário de coexistência entre o Sistema Vítima (SBTVD) e o Sistema Interferente (LTE Femtocélula - USRP) na faixa de 700 MHz descrito no Capítulo 5.

O Capítulo 7 apresenta a comparação e análise dos resultados de interferência de canal adjacente obtidos na simulação desenvolvida no simulador Seamcat e no cenário das medições em campo.

Finalmente no Capítulo 8 se apresentam as conclusões deste trabalho com base nos resultados obtidos nas simulações e nas medições em campo, propondo pesquisas e trabalhos futuros a desenvolver-se a partir desta pesquisa.